*Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 25–35. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006*
*Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 1, pp. 25–35. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006*






УДК 621.791.754 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-25-35

# Исследование проблем импульсно-дуговой сварки на кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства» РИСХМа — ДГТУ



**В. А. Ленивкин, Д. В. Рогозин**
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

*Введение.* История решения проблемы сварки конструкций из нержавеющих и жаропрочных металлов и сплавов насчитывает несколько десятилетий. Особое внимание исследователей привлекла работа с деформированными алюминиевыми сплавами толщиной 2–6 мм. Как правило, такие тонкостенные конструкции свариваются в среде защитного газа аргона при относительно малых величинах тока, поэтому перенос металла — крупнокапельный (сварной шов формируется в виде отдельных крупных капель с узким проплавлением свариваемых элементов). При этом шов получается очень выпуклым, что не отвечает эксплуатационным требованиям конструкций.
Таким образом, важно было решить следующие задачи: получить управляемый мелкокапельный перенос электродного металла на токах, соответствующих крупнокапельному переносу; определить условие управляемого переноса; разработать систему питания сварочной дуги.
*Материалы и методы.* Поведение и параметры дуги фиксировались скоростной кино- и видеосъемкой с синхронным осциллографированием электрических параметров процесса — тока и напряжения. Их регистрировали светолучевыми осциллографами и двухэкранными электронными осциллографами. Данные обрабатывались с помощью компьютерного комплекса и программы *Diadem* 10.1.
*Результаты исследований.* Определено основное условие управляемого переноса металла путем наложения импульсов тока на сварочную дугу от специальных импульсных источников с накопителями и без накопителей электрической энергии. Рассмотрены переходные процессы в электрических цепях основного сварочного источника во время действия импульса тока и паузы. Указаны факторы, обеспечивающие стабильность жесткой и гибкой импульсно-дуговой сварки (ИДС).
*Обсуждение и заключения*. Итоги изучения возможности управления технологическими свойствами сварочной дуги и предложенные методики расчета параметров режима ИДС стали основой разработки технологии и оборудования для механизированной ИДС плавящимся электродом узлов из алюминиевых сплавов. Они внедрены на предприятиях авиационной промышленности, судостроения. Решения для нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов используются на моторостроительных предприятиях. В результате исследований особенностей процесса механизированной сварки активированной электродной проволокой в углекислом газе разработана технология механизированной ИДС для узлов корпусов электропечей из нержавеющей стали, конструкций дорожно-строительных, сельскохозяйственных машин и судов.

***Ключевые слова:*** сварка в защитных газах, плавящийся электрод, параметры импульсов тока, управляемый перенос металла.

***Для цитирования*:** Ленивкин, В. А. Исследование проблем импульсно-дуговой сварки на кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства» РИСХМа — ДГТУ / В. А. Ленивкин, Д. В. Рогозин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 26−36. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-25-35





# Study on pulsed-arc welding issues at the Machines and Welding Production Automation Department, RIAE — DSTU

**V. A. Lenivkin, D. V. Rogozin**
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

*Introduction.* The history of solving the problem of welding structures made of stainless and heat-resistant metals and alloys goes back several decades. Researchers were particularly interested in working with deformed aluminum alloys 2–6 mm thick. As a rule, such thin-walled structures are welded in an argon shielding gas at relatively small currents; therefore, metal transfer is large-droplet (the weld is shaped in the form of separate large droplets with a narrow penetration of the welding components). At the same time, the weld is very convex, which does not meet the operational requirements of the structures. Thus, it was important to solve the following problems: to obtain a controlled fine-drop transfer of electrode metal at currents corresponding to a large-drop transfer; to determine a condition for the controlled transfer; to develop a power supply system for the welding arc.
*Materials and Methods.* The behavior and parameters of the arc were recorded through the high-speed film and video shooting with synchronous oscillography of the electrical process parameters – current and voltage. They were recorded by light-beam oscilloscopes and two-screen oscilloscopes. The data were processed using a computer complex and *Diadem* 10.1 software.
*Results.* The basic condition for the controlled metal transfer is determined through applying current pulses to the welding arc from special pulse sources with and without energy storage devices. Transients in the electrical circuits of the main welding source during the current pulse action and pause are considered. The factors providing stability of rigid and flexible pulsed-arc welding (PAW) are indicated.
*Discussion and Conclusions*. The results of studying the possibility to control the welding arc processing behavior and the proposed methods for calculating the parameters of the PAW mode became the basis for the development of technology and equipment for the mechanized GMAWP of aluminum alloy assemblies. They are introduced at the enterprises of the aviation industry, shipbuilding. Solutions for stainless and heat-resistant steels and alloys are used at the motor industry enterprises. As a result of studies on the mechanized $CO_2$ activated electrode wire welding, a mechanized PAW technology was developed for units of stainless steel electric furnace bodies, structures of road-building, agricultural machinery and ships.

***Keywords:*** welding in shielding gases, consumable electrode, current pulse parameters, controlled metal transfer.

***For citation:*** A. Lenivkin, D.V. Rogozin. Study on pulsed-arc welding issues at the Machines and Welding Production Automation Department, RIAE — DSTU. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 25‒35. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-25-35

**Введение.** С начала шестидесятых годов XX века исследовалась сварка в защитных газах металлоконструкций плавящимся электродом [1]. Одна из основных проблем этого процесса — изготовление сварных конструкций из нержавеющих и жаропрочных металлов и сплавов. Особую сложность представляло создание деформированных алюминиевых сплавов толщиной 2–6 мм. Эти материалы применяются в авиации, моторо- и судостроении, в легкой, пищевой, химической промышленности. Сварка тонкостенных конструкций из указанных металлов выполнялась, как правило, неплавящимся электродом в среде защитного газа аргона с относительно низкой производительностью процесса. Применялась также механизированная сварка плавящимся электродом на относительно малых величинах тока, а значит, с крупнокапельным переносом металла. В этом случае сварной шов на малых величинах тока формируется в виде отдельных сплавленных крупных капель с узким, небольшим проплавлением свариваемых элементов, что не всегда отвечает техническим требованиям, предъявляемым к конструкциям.

Было известно, что при сварке в аргоне существует критический ток. В узком диапазоне его изменения резко меняется характер переноса металла. При величинах тока ниже критического перенос металла крупнокапельный, выше критического — струйный. При крупнокапельном переносе металла получается сварной шов неудовлетворительной формы — с узким, неглубоким проплавлением и большой выпуклостью. Если ток выше критического, при струйном переносе металла шов имеет пальцеобразное проплавление, что снижает долговечность сварного соединения.

При механизированной сварке плавящейся электродной проволоки величина тока периодически кратковременно менялась. Цель этой операции — получить управляемый мелкокапельный перенос электродного ме-

талла на токах, соответствующих крупнокапельному переносу. При этом геометрическая форма шва должна отвечать техническим требованиям, предъявляемым к сварным конструкциям.

**Материалы и методы**

**Система питания дуги при импульсно-дуговой сварке (ИДС).** Для достижения поставленной цели разработана система питания дуги от двух источников электрической энергии. В систему вошли:

— основной источник питания — сварочный преобразователь ПСГ-500 с пологопадающей вольтамперной характеристикой (ВАХ), так как в то время отсутствовали сварочные выпрямители для механизированной сварки в защитных газах;

— специальный импульсный источник питания (ИИП) — генератор импульсов с накопителем энергии.

Основной и импульсный источник включались параллельно на дуговой промежуток.

В первом разработанном ИИП дуги в качестве силовых управляемых вентилей использованы игнитроны на ток 150 А. Затем, когда стали доступны силовые полупроводниковые вентили ВК-200 и ВТ-150, начали изготавливать и внедрять на предприятиях импульсные источники питания на полупроводниковых вентилях. Импульсные источники питания с накопителем энергии защищены авторскими свидетельствами [1, 2].

При параллельном соединении основного и ИИП дуги [2] в период наложения импульсов тока на дугу подается повышенное напряжение. Оно направлено встречно к направлению основного источника и «запирает» основной источник благодаря наличию в его цепи неуправляемого вентиля *V*2 (рис. 1). Под «запиранием» понимается уменьшение тока в цепи основного источника во время действия импульса тока.

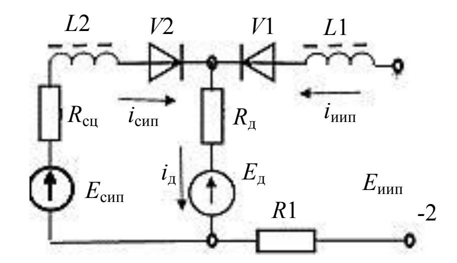



Рис. 1. Эквивалентная схема питания дуги от основного и импульсного источников питания:
$E_{сип}$, $E_{иип}$, $E_д$ — напряжение сварочного, импульсного источников питания и дуги; $i_{сип}$, $i_{иип}$, $i_д$ — ток сварочного, импульсного источников и дуги; $R_{сц}$, $R1$, $R_д$ — активное сопротивление сварочной цепи, импульсного источника и дуги;
$L2$, $L1$ — индуктивность цепей сварочного и импульсного источников;
*V*2, *V*1 — вентили в цепи сварочного и импульсного источников

Однако, несмотря на наличие вентиля *V*2, «запирание» основного источника происходит не мгновенно. Из-за индуктивного сопротивления $L2$ в цепи возникает переходный процесс (во время наложения импульса и после его действия).

Рассмотрим переходный процесс изменения тока в цепи основного источника при наложении импульса тока. Для этого решим линейное дифференциальное уравнение, составленное для цепи основного источника питания (рис. 1):

$$E_c = L_2 \frac{dI_б}{dt} + R_2 I_б + R_д i_{иип}. \tag{1}$$

Здесь $E_с = E_{сип} - E_д$, $R_2 = R_д + R_{сц}$; $I_б$ — ток основного источника питания; $i_{иип}$ — свободный ток в импульсе (например, для синусоидальных импульсов с затухающей амплитудой):

$$i_{иип} = \frac{E_{иип} - E_д}{\omega_0 L1} \, exp\left(-\frac{R_{иц}}{2L1} t\right) sin\omega_0 t,$$

где $R_{иц} = R_1 + R_д$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L1C} - \frac{R_{иц}^2}{4L1^2}}$.

После окончания действия импульса ток в цепи основного источника возрастает по экспоненциальному закону, определяемому постоянной времени цепи основного источника питания $\tau_{сц} = R_{сц}/L_2$.

$$I_б(t)_{t_и \to T_ц} = \left[I_{д0} - I_б(t)_{t=t_б}\right]\left(1 - exp - \frac{t}{\tau_{сц}}\right) + I_б(t)_{t=t_б}. \tag{2}$$

На основании уравнений (1) и (2) получен закон изменения тока в цепи основного источника в период наложения импульса тока и после его окончания [3, 4].

[1] Устройство для импульсно-дуговой сварки: А. С. 226752 СССР: МПК Н05в 32/04 / Н. М. Будник, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров [и др.]. №1019102/25-27; заявл. 05.07.1965; опубл. [в 1968 г.], Бюл. № 29. 4 с.

[2] Устройство для импульсно-дуговой сварки: А. С. 299111 СССР: МПК В 23к 9/00/ Н. М. Будник, Х. Н. Сагиров, Н. Г. Дюргеров [и др.]. № 1342148/25-27; заявл. 20.06.1969; опубл. 04.01 1971, Бюл. № 1. 4 с.

**Методика исследования.** Поведение дуги и ее параметры при сварке в различных пространственных положениях образцов из цветных и черных металлов фиксировали скоростной киносъемкой до 5000 кадров/с и видеосъемкой 2000 кадров/с. Одновременно выполнялось синхронное осциллографирование электрических параметров процесса: ток и напряжение дуги регистрировали светолучевым и электронным осциллографами. Данные, полученные с помощью двухэкранного электронного осциллографа, обрабатывались с помощью компьютерного комплекса и программы *Diadem* 10.1.

Исследовали характер переноса металла, формирование сварного шва, определяли физические и технологические параметры процесса ИДС в защитных газах указанных металлов.

**Результаты исследования**

**Сварка в защитной среде аргона.** Анализ полученных закономерностей позволяет оценить влияние параметров режима ИДС на совместную работу питающей системы дуги, при которой процесс сварки становится неустойчивым. Осциллограммы процесса ИДС при различных индуктивностях цепей сварочного источника питания показаны на рис. 2.

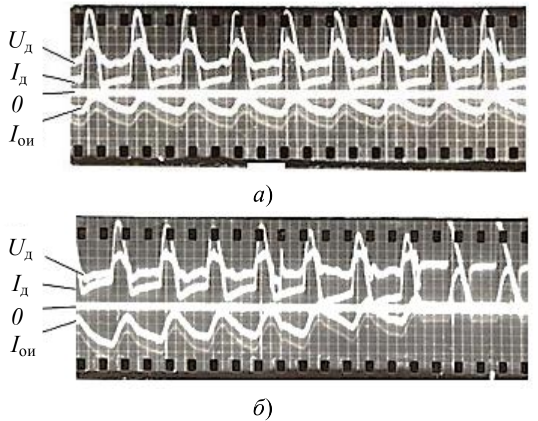
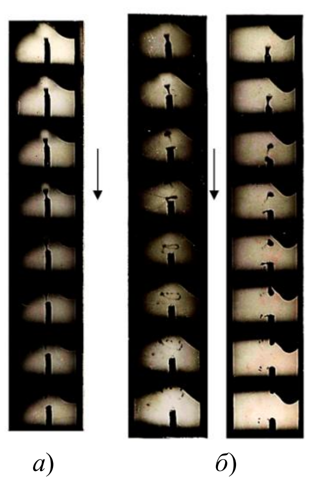



Рис. 2. Осциллограмма тока ($I_д$), напряжения ($U_д$) дуги и тока в цепи сварочного источника питания ($I_{сц}$) ($t_и = 4{,}6\cdot10^{-3}$с, $I_и = 690$ А, $f = 100$ имп/с): горение дуги непрерывное $I_{ср} = 70$ А, $L = (1{,}0 \div 1{,}1)\cdot10^{-3}$ Гн (*а*); горение дуги прерывистое $I_{ср} = 150$ А, $L = 0{,}3\cdot10^{-3}$ Гн (*б*)

Рассмотрены естественный (безимпульсный) и импульсный процессы сварки. Установлено, что при одинаковых величинах эффективного тока скорость перемещения капель в дуговом промежутке всегда выше при ИДС. Причем большей скорости перемещения капли всегда соответствует бо́льшая величина тока в импульсе в момент ее отрыва от электрода. Отрыв капли от электрода может происходить в различных фазах. Это зависит от режима сварки и параметров импульса тока.

При отрыве капли в конце действия импульсов величина тока близка к величине базового тока процесса сварки, и скорость полета капли достигает 1,2–2,0 м/с. В этом случае обеспечивается управляемый направленный перенос металла при сварке во всех пространственных положениях с минимальными потерями металла на разбрызгивание (рис. 3 а).



*а*) *б*)

Рис. 3. Кинограммы ИДС алюминиевого сплава АМг6 в потолочном положении при различных режимах (скорость съемки 4000 кадров/с, сварочная проволока АМг61 диаметром 1,6 мм): эффективный ток $I_{эф}$= 100 А, $t_и = 2{,}5\cdot10^{-3}$ с, $I_и = 310$ А, $f = 50$ имп/с (*а*); $I_{эф} = 180$ А, $t_и = 4{,}5\cdot10^{-3}$ с, $I_и = 500$ А, $f = 50$ имп/с (*б*)

Установлено, что минимальная амплитуда импульса тока $I_{\text{п}\,min}$, которая обеспечивает переход от неуправляемого переноса к управляемому, зависит от:
— поверхностного натяжения электродного металла $\sigma_{\text{п}}$,
— диаметра электрода $d_э$,
— параметров режима сварки, $I_{эф}$, $v_{\text{п}}$:

$$I^2_{\text{п}\,min} t_и = A_1 \sigma_{\text{п}} d_э^2 f^{0,5} / I_с. \quad (3)$$

В случае отрыва капли от электрода при амплитудной величине тока импульса скорость ее полета в дуговом промежутке может превышать 8 м/с. Это приводит к появлению:
— околошовных выплесков (за счет разбрызгивания жидкого металла из сварочной ванны),
— околошовной зоны напыления мелких капель, образующихся при разрыве шейки жидкого металла между электродом и каплей (рис. 3 *б*).

Для уменьшения потерь металла на разбрызгивание амплитуда импульса тока не должна превышать 1,1 $I_{\text{п}\,min}$.

Увеличение $I_{\text{п}}$ ограничено условием непрерывности горения дуги: если эффективный ток постоянен, то при увеличении амплитуды, частоты и длительности импульсов базовый ток уменьшается.

При уменьшении величины базового тока ниже минимального тока устойчивого горения дуги возникают ее обрывы (прерывается сварочный ток), нарушается стабильность процесса сварки (рис. 2 *б*). Это условие было использовано для определения максимальных величин параметров импульсов. Например, максимальная амплитуда импульса от источника с накопителем энергии для униполярных импульсов тока (затухающая синусоида):

$$I_{\text{п}max} < \frac{2I_c}{\pi t_ц f^{0,5}} \sqrt{(\pi^2 t_ц^2 + t_и)} \Big/ \sqrt{t_ц \left(1 - exp\left(\frac{2t_и}{RC}\right)\right)}. \quad (4)$$

На рис. 4 показаны зависимости минимально необходимой амплитуды тока импульса (кривые 1, 1') и максимально допустимой амплитуды (кривые 2, 2') от частоты их следования при различной длительности импульсов. Кривые 1, 1' (при увеличении тока) являются границей перехода от неуправляемого переноса капель металла к управляемому переносу. Кривые 2, 2' — граница перехода от управляемого переноса капель к перерывам в горении дуги. Указанные кривые ограничивают область режимов ИДС плавящимся электродом.

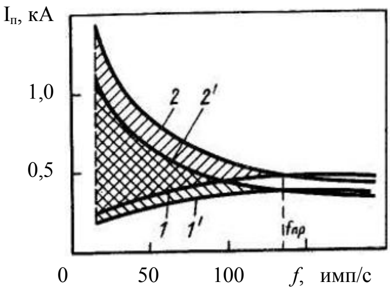



Рис. 4. Области допустимых амплитудных величин импульсов тока:
аргон, сплав АМг6, $I_{эф}$ = 140 А; 1, 2 — $t_и$ = 1,4 мс; 1', 2' — $t_и$ = 2,2 мс

Из уравнений (3) и (4) следует, что с увеличением частоты следования импульсов минимально необходимая амплитуда тока возрастает, а максимально допустимая амплитуда уменьшается. Область управляемого переноса капель сужается.

Под предельной частотой следования импульсов тока ($f_{пр}$) принята такая частота, при которой минимально необходимая амплитуда импульса тока равна максимально допустимой. Эту частоту определили решением уравнений, описывающих $I_{\text{п}\,min}$ (3) и $I_{\text{п}max}$ (4).

**Сварка в активных защитных газах.** Рассмотрена сварка в активных защитных газах ($CO_2$, $N_2$ и смеси $Ar$ < 80 % + $CO_2$ > 20 %) и *He* на токе прямой и обратной полярности. Установлено, что в этом случае наложение импульсов тока с параметрами, применяемыми для сварки в аргоне, не обеспечивает управляемый перенос металла [4, 5]. Наложение импульсов тока при сварке активированной электродной проволокой (солями щелочной группы) током прямой полярности приводит к стабилизации дуги — она принимает форму, соответствующую току выше критического. Однако в промежутках между импульсами, когда ток дуги меньше критического, она интенсивно блуждает. Если капля переходит с электрода в конце действия импульса, когда ток снижается до величины ниже критической, то отрыв и перенос капли проходит в условиях блуждающей дуги. В промежутках между импульсами плавится электродная проволока, и на ее конце всегда имеется некоторый объем расплавленного металла. Вследствие блуждания дуги капля смещается относительно оси электродной

проволоки. При наложении импульса капля срывается и может не попадать в сварочную ванну. Наложение импульсов тока длительностью 1,2–1,8 мс приводит к отрыву капель с электродной проволоки каждым импульсом тока, однако не обеспечивает направленного переноса металла в сварочную ванну и характеризуется повышенным разбрызгиванием.

Установлено, что несоосные капли при наложении импульсов тока в большей мере отклоняются от оси электродной проволоки, чем соосные. Наибольшее количество несоосных капель отрываются от электрода под углом 20–30$^{o}$ и не попадают в сварочную ванну. Соосные капли отрываются под углом, не превышающим 10$^{o}$.

При длительности импульсов 4,0–5,0 мс, вследствие интегрального саморегулирования плавления электрода, снижается базовый ток процесса сварки [6, 7]. На конце электродной проволоки, несмотря на блуждание дуги во время паузы, образуется небольшой объем расплавленного металла. Во время действия импульса тока образуется, как правило, несколько соосных капель, которые переносятся в сварочную ванну, что обусловливает малое разбрызгивание.

Для уменьшения потерь металла на разбрызгивание при сварке активированным электродом в активных защитных газах и их смесях необходимо совмещать процессы плавления и переноса капель в сварочную ванну. Электродная проволока должна плавиться при токе выше критического, когда дуга пространственно устойчивая и не вызывает отклонения траектории полета капель от оси электрода в межэлектродном промежутке [8, 9]. Это достигается следующим образом: на непрерывно горящую дугу накладываются импульсы тока той же полярности с минимально возможной амплитудой $I_п = (1{,}5–2{,}0)\ I_{кр}$ и максимально возможной длительностью $t_и = 4{,}0–10$ мс при частоте следования импульсов соответственно 100–50 имп/с. Базовый ток выбирается минимальным (чтобы во время паузы электродная проволока практически не плавилась). В этом случае в период действия импульса происходит кратковременный струйный перенос металла (СПМ), названный прерывисто-струйным (ПСПМ). При снижении амплитуды импульсов ниже 1,5 $I_{кр}$ струйный перенос металла невозможен.

Импульсный источник питания без накопления энергии был разработан и изготовлен для практического осуществления описанного процесса.

Впервые были определены особенности формирования шва при ИДС. Исследовался характер перемещения жидкого металла в сварочной ванне с наложением и без наложения импульсов тока на дугу. Это позволило выявить факторы, улучшающие формирование шва и удержание металла сварочной ванны при ИДС в различных пространственных положениях.

С помощью скоростной киносъемки (до 5000 кадров в секунду) установлено, что при ИДС жидкий металл из головной части сварочной ванны вытесняется под действием давления дуги и давления, создаваемого каплями переносимого электродного металла [3]. Оказались соизмеримыми скорости перемещения жидкого металла, вызванного давлением дуги за время действия импульса тока и кинетической энергией капель. Поэтому при ИДС за один цикл жидкий металл дважды вытесняется из головной части ванны в хвостовую часть.

С увеличением частоты импульсов при прочих равных условиях (постоянство сварочного тока и напряжения дуги) возрастает частота перемещения жидкого металла в ванне. При этом сокращается время цикла и уменьшается количество перемещаемого металла, который кристаллизуется более тонким слоем, что способствует улучшению первичной кристаллизации металла шва.

ИДС при питании дуги от двух источников (рис. 1), как правило, выполняется по жесткой программе с фиксированной частотой следования импульсов. Форма импульсов тока аналогична кривой поданного повышенного напряжения (рис. 2).

С 1989 года проводятся научно-исследовательские работы по созданию сварочных выпрямителей с инверторными преобразователями для различных способов сварки плавящимся и неплавящимся электродами[1, 2].

**ИДС импульсами прямоугольной формы.** Сварочные выпрямители с инверторным преобразователем создаются на базе высокочастотных инверторов с частотой преобразования тока от 16 кГц. Источники питания сварочной дуги в этом случае малоинерционные — быстродействующие. Это позволяет получать кривую сварочного тока различной формы с изменением величины в широком диапазоне. Наибольшее применение при выполнении сварочных работ находят выпрямители с комбинированными вольтамперными статическими характеристиками с тремя ярко выраженными участками. Крутопадающий участок при токах менее 30 А обеспечивает надежное зажигание дуги и установление процесса сварки. Пологопадающий участок и штыковой участок в диапазоне рабочих режимов обеспечивают стабилизацию сварочного тока в широком диапазоне его регулирования, в широкой области изменения падения напряжения на дуге.

---

[1] Способ дуговой сварки плавлением: А. С. 1776517 СССР: МПК B23 K 9/167, 9/173 / В. А. Ленивкин, П. И. Петров, А. Г. Олейников. № 4913972/08; заявл. 25.09.91; опубл. 23.11.92, Бюл. № 43. 5 с.

[2] Источник питания для дуговой сварки: пат. 2063850 Рос. Федерация. МПК 6 B23 K 9/10 / А. Г. Олейников, В. А. Ленивкин, П. И. Петров, Б. Б. Жмайлов. № 94015103/08; заявл. 25.04.94; опубл. 20.07. 96, Бюл. № 20. 6 с.

Цифровая система управления источником питания дуги обеспечивает быстродействующее изменение формы кривой сварочного тока и поддержание штыкового участка вольтамперной характеристики в диапазоне предела регулирования тока. Источник снабжен системой программного управления для сварки плавящимися и неплавящимися электродами.

Для механизированной сварки плавящейся электродной проволокой с постоянной скоростью ее подачи можно получить ИДС импульсами прямоугольной формы от одного источника питания дуги. Для этого необходимо использовать дискретное двухуровневое переключение вольтамперной характеристики источника питания (ВАХ ИП) со штыковым участком в диапазоне рабочих токов сварочного выпрямителя.

Рассмотрим, как изменяются электрические параметры сварки при постоянной скорости подачи электродной проволоки и дискретном переключении ВАХ сварочного выпрямителя с инверторным преобразователем (рис. 5).

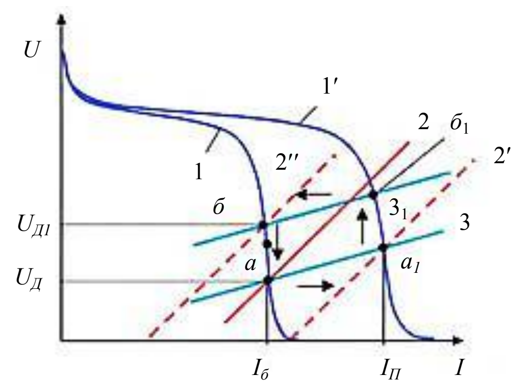



Рис. 5. Изменения энергетических параметров режима при ИДС по гибкой программе: 1 и 1' — ВАХ ИП, обеспечивающие базовый ток $I_б$ и импульсный $I_п$ соответственно; 2 — заданная кривая характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки; 2' и 2" — фиктивные кривые характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки; 3 и $3_1$ — статические вольтамперные характеристики дуги до и после действия импульса тока

Электрические параметры (напряжение $U_д$ и ток дуги $I_б$) устойчивого процесса механизированной сварки плавящейся электродной проволокой определяются точкой *а* (здесь пересекаются ВАХ ИП 1 и линия характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки 2 при неизменной скорости ее подачи).

Известно, что в любой точке устойчивой работы процесса сварки скорость подачи электродной проволоки ($v_п$) равна скорости ее плавления ($v_э$), а длина дугового промежутка ($\ell_д$) зависит от падения напряжения на дуге и остается неизменной. Поэтому через точку *а* устойчивой работы проходит и статическая вольтамперная характеристика дуги (ВАХ Д) 3 с неизменной ее длиной $\ell_д$ (рис. 5).

Величина тока в точке *а* (рис. 5) выбрана меньше величины тока критического, то есть процесс дуговой сварки с крупнокапельным переносом металла для конкретного диаметра и марки электродной проволоки соответствует базовому току процесса сварки $I_б$, который приблизительно определяется зависимостью:

$$I_б = v_п / k_{ст}. \quad (5)$$

Здесь $v_п$ — скорость подачи электрода; $k_{ст}$ — коэффициент саморегулирования по току дуги; $k_{ст} = \frac{1}{28,3\gamma}\frac{\alpha_{пл}}{d_э^2}$ ($\alpha_{пл}$ — коэффициент расплавления электродной проволоки, г/А·ч); γ — плотность электродной проволоки, г/см$^3$.

Падение напряжения на дуге ($U_д$) в точке *а* выбрано из условия, чтобы ВАХ ИП 1 обеспечивала устойчивое горение дуги без коротких замыканий дугового промежутка.

При дискретном переключении ВАХ ИП из положения 1 в положение 1' и неизменной длине дуги параметры режима сварки точки *а* перемещаются в положение точки $a_1$. (На рис. 5 стрелками указано направление изменения величины $I_д$ и $U_д$). Величина тока дуги в точке $a_1$ соответствует заданной амплитудной величине тока импульса ($I_п$), который выбирается из условия обеспечения СПМ во время его действия:

$$I_п \geq (1{,}5 \div 2{,}0) I_{кр},$$

где $I_{кр}$ — критический ток, который определяется величиной сварочного тока, диаметром и маркой электродной проволоки, длиной дугового промежутка.

Устойчивый процесс сварки с непрерывным горением дуги в точке $a_1$ и неизменной длиной дуги $\ell_д$ и $I_п$ может установиться при пересечении ВАХ ИП 1' с линией саморегулирования плавления электродной проволоки 2', если падение напряжения будет незначительно больше, чем в точке *а* ($v_п = v_э$). Это связано с тем, что в реальных условиях сварки при измерении падения напряжения на дуге одновременно учитывается и падение

напряжения на вылете электродной проволоки. Поэтому увеличение падения напряжения в точке $a_1$ вызвано повышением падения напряжения на вылете электрода и сопротивления дуги при большем токе $I_п$.

При переключении ВАХ ИП из положения 1 в положение 1' параметры режима сварки (ток и напряжение дуги) определяются точкой пересечения ВАХ ИП 1' и ВАХ Д 3. В этом случае процесс сварки неустойчивый, т. к. скорость плавления электродной проволокой в точке $a_1$ остается неизменной и определяется кривой саморегулирования плавления электрода 2, а $v_э$ при $I_п$ будет больше $v_п$ на величину $\Delta v_э$:

$$\Delta v_э = k_{ст}(I_п - I_б). \quad (6)$$

При этом длина дуги начнет увеличиваться. Статическая характеристика дуги 3 начнет эквидистантно смещаться вверх из точки $a_1$ в направлении точки $б_1$.

Установлено, что с увеличением длины дуги при постоянной величине сварочного тока и неизменной скорости подачи электродной проволоки уменьшается ее вылет и снижается тепловая мощность, расходуемая на плавление электрода. Частота струйного переноса металла уменьшается, а размеры переносимых капель увеличиваются. Струйный перенос металла монотонно переходит в крупнокапельный.

При совмещении точки $a_1$ с точкой пересечения ВАХ ИП 1' и линией саморегулирования плавления электродной проволоки 2 устанавливается новая точка устойчивой работы с переносом металла, как и в точке $a$, в которой $v_п = v_э$, но при другой длине дуги.

Для ИДС со СПМ необходимо переключать ВАХ ИП из положения 1' в положение 1 при меньшей длине дуги $\ell_{д3}$, чем в точке $б_1$, при которой еще не нарушается СПМ.

Во время горения дуги на токе $I_п$ ВАХ Д перемещается эквидистантно из точки $a_1$ в точку $б_1$. При этом длина дуги увеличивается на $\Delta\ell_{д1}$, и статическая характеристика дуги займет положение $3_1$ (рис. 5). Падение напряжения на дуге возрастет на величину

$$\Delta U_д = k_д \Delta\ell_{д1} + k_{дт}(I_п - I_б), \quad (7)$$

где $k_д$ — градиент потенциала столба дуги, В/мм; $k_{дт}$ — коэффициент, характеризующий наклон (ВАХ Д).

При дискретном переключении ВАХ ИП из положения 1' в положение 1 параметры режима и процесс сварки переходят из точки $б_1$, соответствующей току импульса $I_п$, в точку $б$, соответствующую базовому току $I_б$. Сварка в точке $б$ была бы устойчивой, если бы ВАХ ИП пересекалась линией характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки 2'', которая соответствует меньшей $v_п$, чем заданная скорость кривой характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки 2. Поэтому скорость плавления электродной проволоки $v_э$ в точке $б$ резко замедляется при практически постоянном базовом токе $I_б$. Дуговой промежуток начинает сокращаться, так как $v_п > vэ$ . Статическая характеристика дуги эквидистантно смещается из точки $б$ к точке устойчивой работы $a$. За время горения дуги при базовом токе длина дуги уменьшается на величину $\Delta\ell_{д2}$.

При совмещении статической ВАХ Д $3_1$ с характеристикой 3 $\Delta\ell_{д1} = |\Delta\ell_{д2}|$ напряжение на дуге становится равным заданному нижнему уровню срабатывания двухуровневого датчика. В этот момент ВАХ ИП переключается из положения 1 в положение 1', и процесс периодически повторяется.

Длительность паузы $t_п$ определяется временем горения дуги между точками $б$ и $a$ на токе $I_б$, а длительность импульса $t_и$ — между точками $a_1$ и $б_1$ на токе $I_п$.

ВАХ ИП из положения 1 в положение 1' и обратно переключается автоматически в зависимости от заданного перепада напряжения горения дуги при базовом и импульсном токе. Перепад напряжения задается для базового тока $a$ и импульсного тока $б_1$. Информацию о базовом и импульсном напряжениях система управления источника питания получает с помощью двухуровневого датчика напряжения. В этом случае система управления сварочным источником питания работает по гибкой программе. Частота переключений «импульс — пауза» зависит от установленной разности падения напряжений между величинами базового и импульсного токов.

В ряде случаев, например при сварке в вертикальном и потолочном положениях, необходима большая скорость полета капель, чем при естественном переносе металла. Поэтому импульсное ведение процесса должно осуществляться и в том случае, когда сварочный ток соответствует мелкокапельному переносу металла, причем должно выполняться условие

$$k_{нр} = f_к / f \geq 1, \quad (8)$$

где $k_{нр}$ — коэффициент нерегулярности переноса капель, $f_к$ — частота перехода капель под действием импульсов тока, $f$ — частота перехода капель естественного процесса.

Оптимальные параметры импульсного процесса в зависимости от пространственного положения сварки должны отвечать условиям, описанным уравнениями (3) и (8).

Минимальная длительность импульса, обеспечивающая прерывисто-струйный перенос металла, составляет $(4{,}5–5{,}0)\cdot 10^{-3}$ с при $I_п = (1{,}5–2{,}0)\,I_{кр}$. В этом случае частота следования импульсов максимальна (110–

100 имп./с). Наибольшая длительность импульса определяется из условия обеспечения СПМ при постоянной величине $I_п$ и максимально допустимой $\ell_д$. Частота следования импульсов выбирается из условия обеспечения равномерности формирования ширины шва по его длине и не должна быть меньше 10 имп./с.

На рис. 6 приведены фрагменты осциллограмм тока и напряжения ИДС с прерывисто-струйным переносом металла [1].

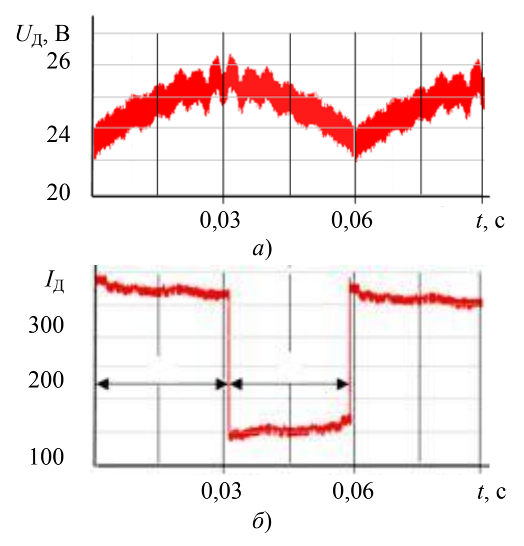



Рис. 6. Фрагмент участка синхронных осциллограмм ИДС импульсами тока прямоугольной формы с ПСПМ: напряжение (*а*), ток дуги (*б*)

На осциллограммах зафиксирован момент перехода горения дуги с базового тока 160 А (точка 1) на ток импульса ($I_п$ = 375 А, точка 2). Ток 160 А меньше критического тока для электродной проволоки 1,2 мм ($I_{кр}$ равно 190÷200 А). Ток в импульсе в этом случае составляет (1,97÷1,87) $I_{кр}$. Падение напряжения на дуге в момент переключения с $I_б$ на $I_п$ составляет 22,8 В. При горении дуги во время действия импульса тока напряжение на ней возрастает до 25,8 В.

Поэтому за время действия импульса тока $t_и$ длительностью $31{\cdot}10^{-3}$ с длина дуги увеличивается на $\Delta\ell_д \leq 2$ мм, а за время горения дуги на $I_б$ в паузе $t_п$ длительностью $29{\cdot}10^{-3}$ с длина дуги уменьшается на эту же величину. Частота следования импульсов 16,6 имп/с.

ВАХ ИП автоматически переключается из положения 1, соответствующего сварке на токе паузы ($I_б$), в положение $1_1$ (соответствует току импульса) и обратно. Переключение зависит от заданного перепада напряжений

$$\Delta U_д = k_д \Delta\ell_д,$$

где $k_д$ — градиент потенциала столба дуги при сварке в аргоне на токе выше критического 1,4 В/мм) между точками *а* и $б_1$ (соответствует длинам дуги в этих точках, рис. 5).

С помощью двухуровневого датчика напряжения система управления источником питания получает информацию об изменении величины напряжения между базовыми и импульсными токами.

**Обсуждение и заключения.** Известны две основные разновидности ИДС. Первая — работа в режиме «импульс — капля»: при $t_и$, равном $(1{,}5–2{,}5){\cdot}10^{-3}$ с каждый импульс в конце его действия переносит одну каплю электродного металла с электродной проволоки в сварочную ванну. В этом случае процессы плавления и переноса электродного металла в значительной мере разделены во времени.

При второй разновидности ИДС импульс действует значительно дольше ($t_и \geq 4{,}0{\cdot}10^{-3}$ с и более), и происходит прерывисто-струйный перенос металла. В этом случае процессы плавления и переноса металла совмещены.

Система управления процессом импульсно-дуговой сварки обеспечивает плавную регулировку частоты следования импульсов тока, которая зависит от заданного приращения длины дугового промежутка, т. е. напряжения срабатывания двухуровневого датчика и амплитуды тока импульса. Частота следования им-

[1] Способ импульсно-дуговой сварки: пат. 2570145 Рос. Федерация. МПК B23 K 9/09, B23 K 9/16 / В. А. Ленивкин, Д. М. Киселёв, Н. Г. Дюргеров. № 2014108519/02; заявл. 06.03.2014; опубл. 10.12. 2015. Бюл. № 34. 5 с.

пульсов тока, длительность импульсов и пауз изменяются плавно и определяются приращением длины дугового промежутка во время действия тока импульса в зависимости от величин заданного тока в паузе и импульсе.

Гибкость программы ПСПМ достигается за счет применения двухуровневого датчика напряжения. Нижний уровень напряжения срабатывания датчика определяется параметрами режима сварки, обеспечивающими устойчивый режим процесса в паузе на токе ниже критического. Верхний уровень зависит от удлинения дуги на 0,5–2,0 мм при горении дуги на токе, обеспечивающем СПМ.

Разработанная система ИДС прямоугольными импульсами путем переключения комбинированных ВАХ-выпрямителей с инверторным преобразователем применяется при механизированной сварке в аргоне и газовой смеси (аргон > 80 % и $CO_2$ < 20 %) по жесткой программе «импульс — капля» и гибкой программе «прерывисто-струйный перенос».

Итоги изучения возможности управления технологическими свойствами сварочной дуги и предложенные методики расчета параметров режима ИДС стали основой разработки технологии и оборудования для механизированной ИДС плавящимся электродом узлов из алюминиевых сплавов АМц, АМцМ, АД1, АМг6, АМг61, 01915. Указанные разработки внедрены на предприятиях авиационной промышленности, судостроения. Решения для нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов используются на моторостроительных предприятиях.

В результате исследований особенностей процесса механизированной сварки активированной электродной проволокой в углекислом газе разработана технология механизированной ИДС для узлов корпусов электропечей из нержавеющей стали Х18Н10Т, узлов конструкций дорожно-строительных, сельскохозяйственных машин и судов активированной электродной проволокой Св-08Г2С. По результатам научно-исследовательских работ 1985 года в «Энергоатомиздате» была издана монография «Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом».

Разработки защищены 17 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения. По результатам исследований опубликована 31 статья в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

**Библиографический список**

1. Потапьевский, А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах / А. Г. Потапьевский. — Киев : Экотехнология, 2007. — 192 с.

2. Дюргеров, Н. Г. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров, В. А. Ленивкин. — Москва : Энергоатомиздат, 1985. — 80 с.

3. Ленивкин, В. А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. — 3-е изд., доп. — Москва : Машиностроение, 2011. — 368 с.

4. Крампит, А. Г. Влияние параметров импульсов сварочного тока на формирование сварного шва / А. Г. Крампит // Сварка и диагностика. — 2013. — № 2. — С. 11–13.

5. Крампит, А. Г. Влияние величины жидкой прослойки на формирование заполняющих слоев при импульсно-дуговой сварке в щелевую разделку / А. Г. Крампит // Сварка и диагностика. — 2014. — № 2. — С. 13–16.

6. К вопросу саморегулирования дуги при сварке плавящимся электродом / Б. Е. Патон, В. С. Сидорук, С. Ю. Максимов, Ю. Н. Сараев // Сварочное производство. — 2014. — № 12. — С. 3–11.

7. Дюргеров, Н. Г. Устойчивость системы саморегулирования при механизированной и автоматической сварке / Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров // Сварочное производство. — 2009. — № 2. — С. 13–14.

8. Дюргеров, Н. Г. Определение свойств дуги при импульсных процессах / Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сагиров // Сварочное производство. — 2004. — № 4. — С. 14–18.

9. Импульсные технологии управления каплепереносом при MIG/MAG сварке / Н. П. Алешин, Э. А. Гладков, В. Н. Бродягин [и др.] // Сварка и диагностика. — 2014. — № 3. — С. 43–47.

Сдана в редакцию 27.12.2019
Запланирована в номер 03.02.2020

*Об авторах:*

**Ленивкин Вячеслав Андреевич,** ведущий научный сотрудник Центра научных компетенций ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3325-5515, weld-dstu@ya.ru

**Рогозин Дмитрий Викторович,** заведующий кафедрой «Машины и автоматизация сварочного производства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-33110524, dmrogozin@ya.ru

*Заявленный вклад соавторов*

В. А. Ленивкин — формирование основной концепции, определение целей и задач исследования, разработка теоретических основ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом, научное руководство; В. Д. Рогозин — исследование саморегулирования процесса импульсно-дуговой сварки в защитных газах, обработка и оформление результатов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*